

## Глава 5. СИЛУМИН С ГЛОБУЛЯРНЫМ КРЕМНИЕМ. ПОЛУЧЕНИЕ, СВОЙСТВА, ПРИМЕНЕНИЕ

Марукович Е.И., Стеценко В.Ю., Гутев А.П.

*Институт технологии металлов НАН Беларуси*

*г. Могилев, Беларусь, E-mail: lms@itm.by*

### Введение

Основным недостатком литейных сплавов является дендритная структура отливок. Дендритные, особенно хрупкие, фазы, переплетаясь и соединяясь между собой ветвями, существенно снижают механические свойства заготовок. В этом отношении, самыми неблагоприятными для микроструктуры отливок являются лепестковые (пластинчатые) дендриты. Поэтому чугун с пластинчатым графитом является хрупким материалом. Низкими механическими свойствами обладает силумин с пластинчатым кремнием. Сплавы с глобулярной микроструктурой обладают повышенными свойствами, поскольку соответствуют принципу Шарпи. В настоящее время в промышленных масштабах удалось получать чугун с глобулярным (шаровидным) графитом (ЧГГ). Он получается в условиях более быстрого затвердевания отливки и обработки расплава сфероидизирующими магнием содержащими лигатурами. Последнее условие наиболее важное, поскольку позволяет получать отливки из ЧГГ в песчано-глинистых и стержневых формах. При литье в металлические формы получается отбеленный чугун, который становится ЧГГ только после длительного отжига. Чугун с глобулярным графитом, благодаря инверсии микроструктуры, является высокопрочным и относительно пластичным материалом. По механическим свойствам в литом состоянии он не уступает литым углеродистым и малолегированным сталям. Поэтому ЧГГ является более дешевым заменителем сталей для многих деталей машин и механизмов.

Примесное модифицирование не устраняет дендритную структуру эвтектического кремния в отливках из силумина. Наилучшим измельчителем алюминиево-кремниевой эвтектики этого сплава является натрий. Но он только увеличивает степень разветвленности кремниевых дендритов. Чтобы существенно повысить механические свойства силуминовых заготовок необходимо получать отливки с недендритной, глобулярной микроструктурой. Из всех способов для этой цели наиболее эффективным является литье ускоренным затвердеванием [1]. Глобулярная микроструктура получается тогда, когда при затвердевании отливки образуется относительно большое количество центров кристаллизации, которые не успевают превратиться в дендриты. Для этого нужна более высокая линейная скорость затвердевания, чем при литье в обычный (щелевой) кристаллизатор. В Институте технологии металлов НАН Беларуси (ИТМ НАН Беларуси) разработаны два способа литья ускоренным затвердеванием, обеспечивающих получение заготовок из силумина с глобулярным кремнием (СГК). Первый – метод литья закалочным затвердеванием [2]. Второй – литье в кристаллизаторы с использованием затопленно-струйного первичного и вторичного охлаждения отливки.

### 1. Способы литья заготовок из СГК

Суть метода литья закалочным затвердеванием заключается в следующем:

- расплавом с помощью заливочного устройства 1 заполняют стационарный 2 и подвижный 3 кристаллизаторы (рис. 1а);
- после достижения заданного уровня жидкий металл выдерживается для формирования стакана 4 с толщиной стенки 3-10 мм (рис. 1б);
- с помощью подвижного кристаллизатора 3 происходит извлечение стакана 4 с расплавом 5 и их охлаждение в закалочной ванне 6 (рис 1в, г).

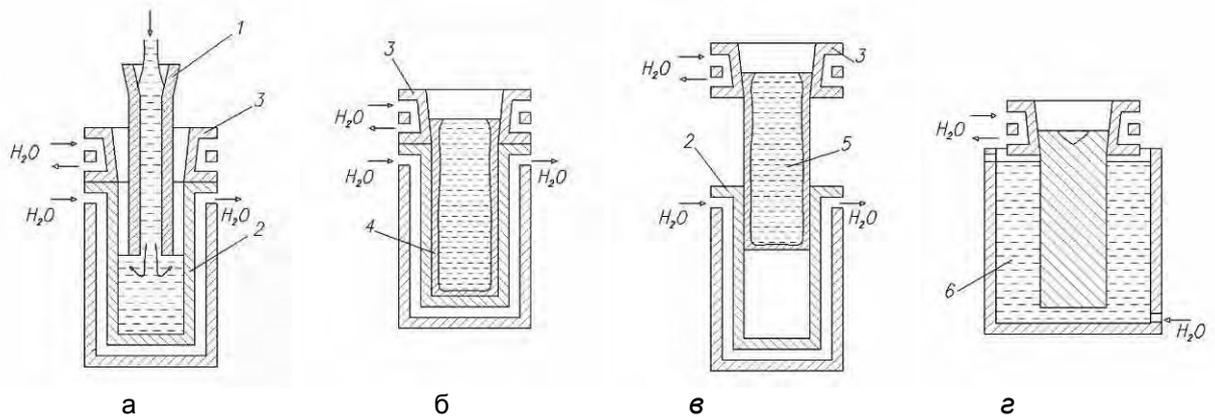


Рисунок 1 – Схема литья закалочным затвердеванием:

- 1 – заливочное устройство; 2 – стационарный кристаллизатор; 3 – подвижный кристаллизатор;  
 4 – стакан; 5 – расплав; 6 – закалочная ванна; а – заполнение кристаллизатора;  
 б – формирование стакана; в – извлечение стакана с расплавом;  
 г – закалочное затвердевание – получение отливки.

По сравнению с непрерывными способами литья данная схема получения заготовок обеспечивает более высокую скорость затвердевания, поскольку устраняется газовый зазор между отливкой и кристаллизатором. Это достигается тем, что формирующаяся отливка, в основном (кроме начальной корки) затвердевает непосредственно в закалочной ванне. Линейная скорость затвердевания при литье закалочным затвердеванием на порядок больше, чем при литье в обычный кристаллизатор. В результате получают отливки с глобулярным наноструктурным кремнием (рис. 2).

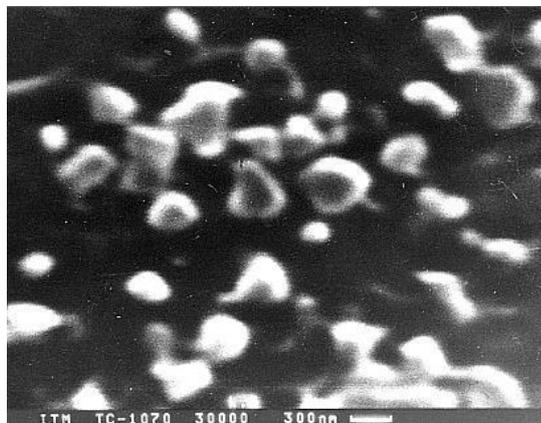


Рисунок 2 – Микроструктура литой заготовки диаметром 50 мм из сплава Al+12%Si (x30000)

Метод литья закалочным затвердеванием позволяет получать литые заготовки диаметром 50...150 мм и высотой до 300 мм. Они, по сравнению с аналогичными непрерывнолитыми (серийными), имеют в 6...10 раз выше дисперсность фазовых составляющих и в 1,5...2 раза выше предел прочности на разрыв. Методом литья закалочным затвердеванием можно получать отливки с дисперсностью кристаллов эвтектического кремния 200 нм.

При литье в струйный кристаллизатор используется затопленно-струйный метод охлаждения [3]. Он при прочих равных гидравлических параметрах позволяет увеличить коэффициент теплоотдачи от охлаждающей поверхности к охладителю более, чем в 2 раза [1]. Это происходит благодаря уменьшению толщины гидродинамического и, следовательно, толщины теплового пограничного слоев. Были разработаны конструкции кристаллизаторов двух типов. Первый – глуходонный для получения мерных литых заготовок из СГК. Второй – проходной кристаллизатор для непрерывного горизонтального литья (НГЛ) слитков из СГК. Схема глуходонного кристаллизатора представлена на рисунке 3.

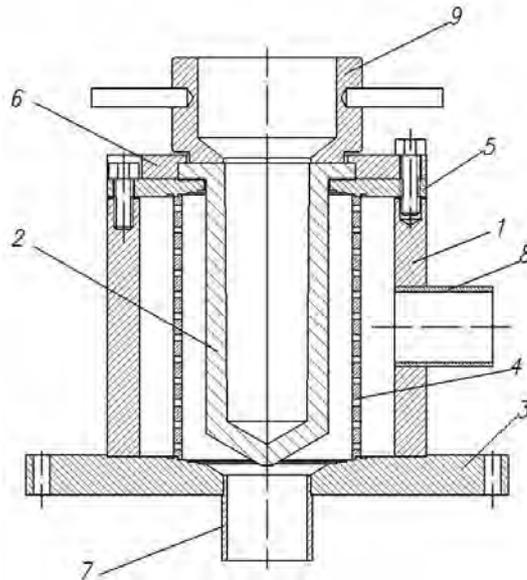


Рисунок 3 – Схема глухондонного струйного кристаллизатора

1 – корпус; 2 – гильза; 3 – основание; 4 – экран; 5 – фланец; 6 – крышка; 7 – отводящий патрубок; 8 – подводящий патрубок; 9 – захват

Охлаждение гильзы струйного кристаллизатора осуществляется следующим образом. Охладитель поступает в полость между корпусом и экраном, далее – равномерно продавливается в виде затопленных струй через отверстия в экране. Струи охладителя с высокой скоростью ударяют перпендикулярно о наружную поверхность гильзы кристаллизатора. При этом толщина теплового пограничного слоя уменьшается и остается постоянной, обеспечивая высокую интенсивность и равномерность охлаждения гильзы кристаллизатора (рис. 4). Линейная скорость затвердевания отливки диаметром 100 мм из эвтектического силумина в струйном кристаллизаторе в 3 раза выше, чем в обычном (щелевом) кристаллизаторе. Это обеспечивает получение литых заготовок из СГК (рис. 5).

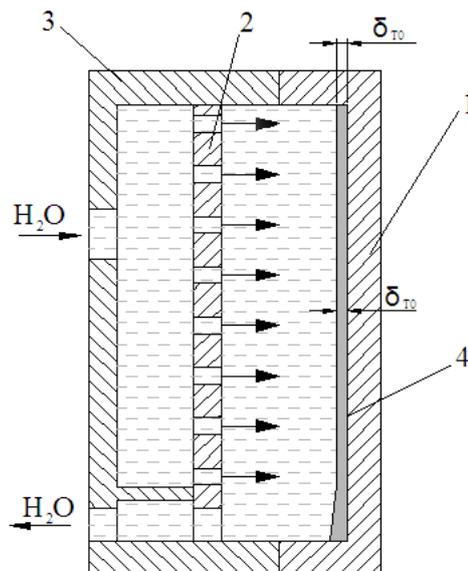


Рисунок 4 – Схема затопленно-струйного охлаждения кристаллизатора

1 – гильза кристаллизатора; 2 – экран; 3 – корпус; 4 – тепловой пограничный слой

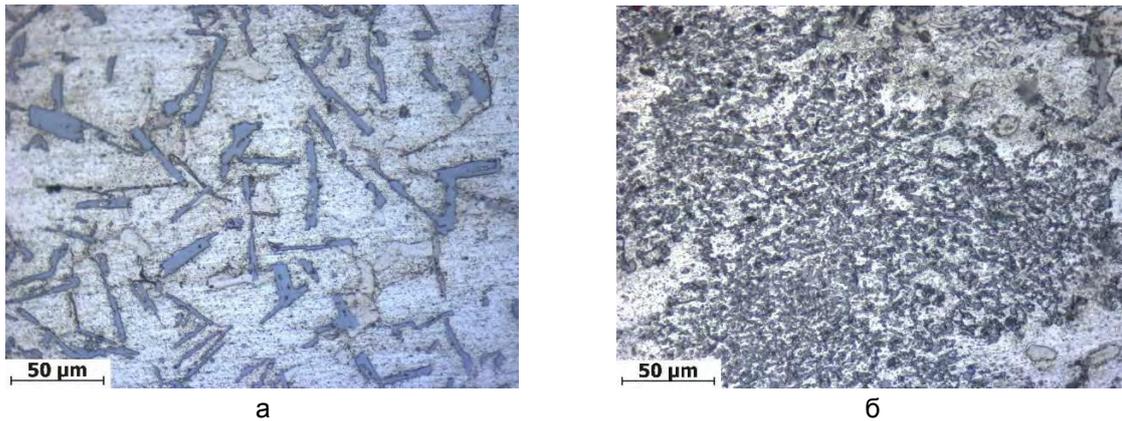


Рисунок 5 – Микроструктура литой заготовки диаметром 100 мм из сплава АК12М3 (x1000):  
а – литье в обычный (щелевой) кристаллизатор; б – литье в струйный кристаллизатор

В ИТМ НАН Беларуси разработаны глуходонные струйные кристаллизаторы для литья мерных заготовок диаметром до 200 мм и высотой до 300 мм из СГК. Общий вид заготовок представлен на рисунке 6.



Рисунок 6 – Заготовки из СГК, полученные литьем в струйные кристаллизаторы

В ИТМ НАН Беларуси разработан метод НГЛ в струйный кристаллизатор с устройством затопленно-струйного вторичного охлаждения. Схема представлена на рисунке 7, а общий вид – на рисунке 8.

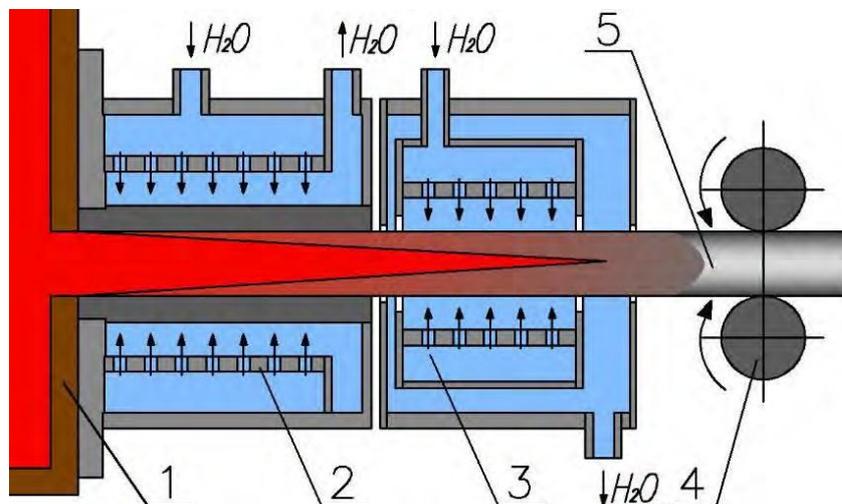


Рисунок 7 – Схема НГЛ в струйный кристаллизатор с использованием вторичного охлаждения:  
1- металлоприёмник; 2 – струйный кристаллизатор; 3 – устройство затопленно-струйного

вторичного охлаждения; 4 – тянущее устройство; 5 – слиток



Рисунок 8 – Непрерывное горизонтальное литье с использованием струйного охлаждения

Скорость НГЛ слитков диаметром 70 мм из СГК составляет 1,4 м/мин, что на порядок выше, чем у лучших мировых аналогов (фирма Sung Hoon Engineering, Корея).

В ИТМ НАН Беларуси разработаны проходные кристаллизаторы для НГЛ слитков диаметром 40...90 мм из СГК. Общий вид непрерывнолитых заготовок из СГК представлен на рисунке 9.



Рисунок 9 – Непрерывнолитые заготовки из СГК

В ИТМ НАН Беларуси разработаны методы кокильного и центробежного литья полых заготовок диаметром 90...350 мм и высотой до 200 мм из СГК. Для этого используется эффект структурной наследственности, когда микроструктура шихтовых отливок из СГК сохраняется в получаемой литой заготовке. Общий вид полых отливок из СГК представлен на рисунке 10.



Рисунок 10 – Полые отливки из СГК

## 2. Механические и антифрикционные свойства заготовок из СГК

Литые заготовки из силумина, полученные литьем в струйные кристаллизаторы имеют высокодисперсную инвертированную микроструктуру. Размер глобул эвтектического кремния составляет 1...3 мкм. Глобулярная микроструктура силумина делает его деформируемым сплавом, что позволяет повысить механические свойства заготовок. Размер глобул эвтектического кремния в СГК можно увеличить путем ускоренного (в течение 3...6 часов) отжига отливок при 510...520°C (рис. 11).

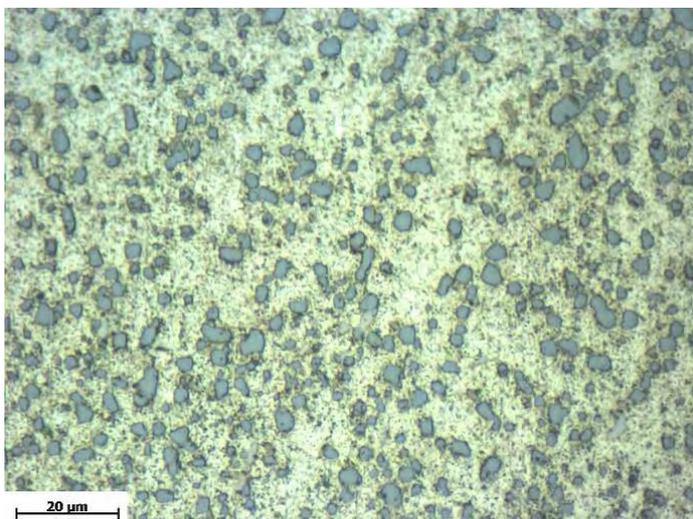


Рисунок 11 – Микроструктура заготовок из СГК после термической обработки

После термической обработки по режиму T5 непрерывнолитые заготовки из эвтектического СГК (АК12МЗ) имеют временное сопротивление разрыву 350...450 МПа и относительное удлинение 3...5%. После прокатки со степенью деформации 65% предел прочности заготовок из СГК увеличивается в среднем на 40%, а относительное удлинение – в 4 раза.

Высокая степень структурной инверсии и высокодисперсная микроструктура обеспечивают СГК уникальные антифрикционные свойства. Их исследовали в Санкт-Петербургском институте машиностроения. Были проведены сравнительные триботехнические испытания образцов из СГК и бронзы БрОЦС5-5-5. При сухом трении испытания проводились на торцевой машине трения при нормальном напряжении 12,8 Н и вращении образца из стали 45 со скоростью 60 рад/с. Результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнительная износостойкость образцов в условиях сухого трения

Пара трения	Материал	Вес до испытания, г	Вес после испытания, г	Массовый износ, г	Размер до испытания (Н1/Н2), мм	Размер после испытания (Н1/Н2), мм	Линейный износ, мм
Сталь – бронза	Сталь 45	141,602	141,607	0,005 (прибав.)	11,76	11,77	0,01 (прибав.)
	БрОЦС 5-5-5	182,507	180,832	1,675 (потеря)	11,97	11,76	0,21 (потеря)
Сталь – силумин	Сталь 45	139,840	139,841	0,001 (прибав.)	11,27	11,27	0
	СГК	56,669	56,646	0,023 (потеря)	11,99	11,96	0,03 (потеря)

Из данных таблицы 1 следует, что в условиях сухого трения по стали 45 линейный износ образцов из СГК в 7 раз ниже, чем у образцов из бронзы БрОЦС5-5-5. Аналогичные испытания были проведены на машине трения СМЦ-2 со смазкой И20А при нормальном напряжении 200 Н и вращении образца из стали 45 со скоростью 30 рад/с. Результаты представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Сравнительная износостойкость образцов в условиях смазки

Пара трения	Материал	Вес до испытания, г	Вес после испытания, г	Массовый износ, г	Размер до испытания (Н1/Н2), мм	Размер после испытания (Н1/Н2), мм	Линейный износ, мм
Сталь – бронза	Сталь 45	157,437	157,434	0,003 (потеря)	50,05	50,05	0
	БрОЦС5-5-5	161,241	156,837	4,404 (потеря)	50,05	46,09	3,96 (потеря)
Сталь – силумин	Сталь 45	157,191	157,190	0,001 (потеря)	50,06	50,06	0
	СГК	48,957	48,948	0,009 (потеря)	49,94	49,77	0,17 (потеря)

Из данных таблицы 1 следует, что в условиях трения со смазкой И20А по стали 45 линейный износ образцов из СГК в 23 раз ниже, чем у аналогичных из бронзы БрОЦС5-5-5. В условиях сухого трения коэффициент трения скольжения по стали 45 у образцов из СГК были в среднем в 1,65 раз ниже, чем у аналогичных образцов из бронзы БрОЦС5-5-5 (рис. 12). В условиях трения со смазкой И20А коэффициент трения скольжения по стали 45 у образцов из СГК были в среднем в 1,35 раз ниже, чем у аналогичных образцов из бронзы БрОЦС5-5-5 (рис. 13). Аналогичные результаты получили по сравнению с бронзой БрАЖ9-4. Испытания проводили на машине трения СМЦ-2 в условиях сухого трения по схеме «вал-втулка» при давлении 0,6 МПа и скорости скольжения образца относительно стального шлифованного вала из стали 45 0,38 м/с. Было установлено, что линейный износ образцов из СГК в 10...15 раз ниже, чем у аналогичных образцов из бронзы БрАЖ9-4. Эти испытания свидетельствуют о том, что СГК может заменить традиционные антифрикционные бронзы в узлах трения машин и механизмов.

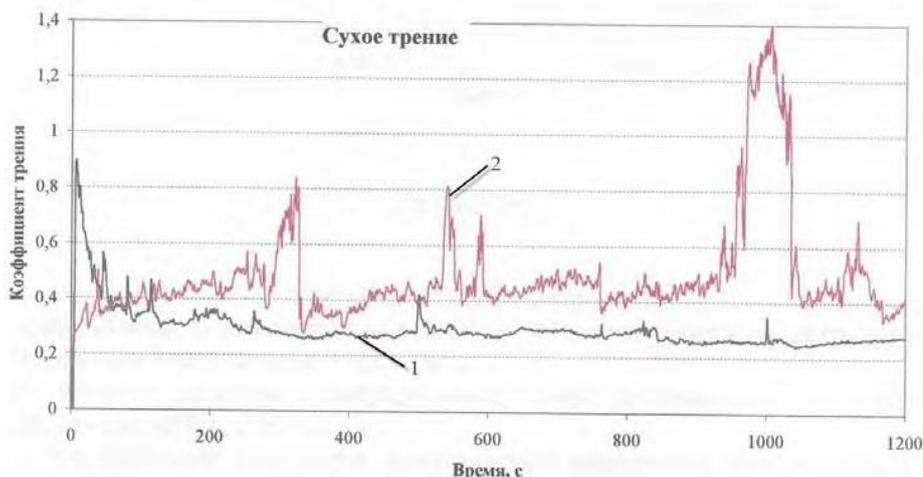


Рисунок 12 – Сравнительные изменения коэффициентов трения от времени испытания при сухом трении по стали 45: 1 – СГК; 2 – бронза БрОЦС5-5-5

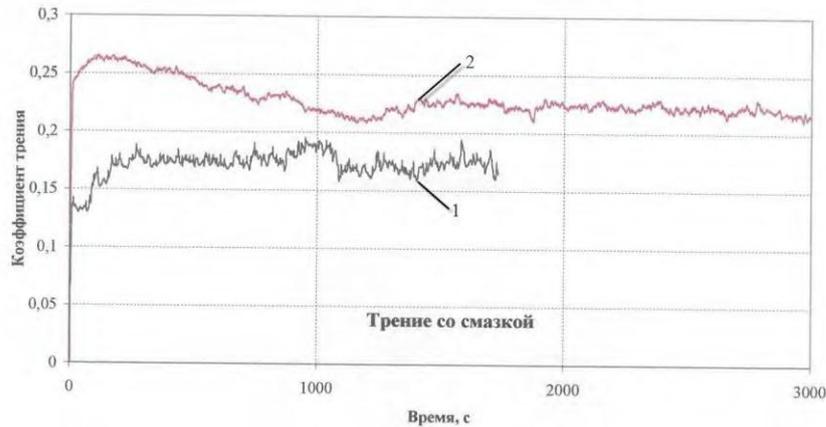


Рисунок 13 – Сравнительные изменения коэффициентов трения от времени испытания при трении со смазкой по стали 45: 1 – СГК; 2 – бронза БрОЦС5-5-5

### 3. Применение заготовок из СГК

Были проведены опытно-промышленные испытания деталей из СГК в сравнении с аналогичными из бронз. На РУП «Завод «Оптик» (г. Лида) из СГК были изготовлены и прошли испытания шестерни червячных колес редуктора шлифовально-полировального станка 6ШП-100 взамен бронзовых БрАЖ9-4. Установлено, что шестерня червячного колеса из заготовки диаметром 115 мм из СГК имело ресурс работы в 6 раз выше, чем серийные из бронзы БрАЖ9-4.

На РУПП «Оршанский станкостроительный завод «Красный борец» из СГК была изготовлена и прошла испытание на плоскошлифовальном станке шестерня червячного колеса взамен бронзового БрОЦС5-5-5. Установлено, что опытная шестерня червячного колеса из СГК не уступает серийному и рекомендовано для использования взамен бронзового.

На РУП «Завод «Эвистор» (г. Витебск) из СГК были изготовлены и прошли испытания шестерни зубчатых колес из СГК в элеваторе вариатора вентилятора ЭВВ-1 взамен бронзового БрАЖН10-4-4. Установлено, что опытные шестерни зубчатых колес из СГК не уступают серийным и рекомендованы для использования взамен бронзовых.

Втулки из СГК успешно прошли производственные испытания на ОАО «Белшина» (г. Бобруйск), где были установлены в парах скольжения сборочных станков взамен аналогичных втулок из бронзы БрОЦС5-5-5. Смазка узла, в котором проводились испытания, не предусматривалась. Установлено, что опытные втулки из СГК не уступают серийным и рекомендованы для замены аналогичных из бронз в парах скольжения сборочного оборудования ОАО «Белшина».

Подшипники скольжения из СГК успешно прошли производственные испытания заводе «Могилёвтрансмаш» ОАО «МАЗ». В полуприцеп были установлены балансиры с серийными из бронзы из БрАЖМц10-3-1,5 и втулками из СГК. При текущем ремонте полуприцепа, после 20 000 км пробега, было установлено, что втулки балансира из СГК по износостойкости превосходят аналогичные из бронзы БрАЖМц10-3-1,5 и рекомендованы в качестве заменителя серийных.

На ОАО «БЕЛАЗ» – управляющая компания «БЕЛАЗ-ХОЛДИНГ» проводились испытания опытных втулок из СГК сателлитов дифференциалов карьерных самосвалов взамен аналогичных втулок из бронзы БрОФ6,5-0,15. Установлено, что износостойкость опытных втулок из СГК находилась на уровне серийных из бронзы БрОФ6,5-0,15.

На ОАО «Гомельский завод станочных узлов» проводились испытания вкладышей люнета токарных станков, изготовленных из СГК в сравнении с аналогичными вкладышами из бронзы БрОЦс5-5-5. В результате проведенных испытаний установлено, что стойкость вкладышей, изготовленных из СГК, в 6 раз превышает стойкость аналогичных вкладышей из бронзы БрОЦС5-5-5.

Опытно-промышленные испытания деталей из СГК были проведены на 16-ти предприятиях Беларуси и России (табл. 3)

Таблица 3 – Опыт-промышленные испытания деталей из СГК

№ п/п	Предприятие	Страна	Результат
1	ПАО «Таганрогский металлургический завод»	Россия	Превосходят бронзовые
2	ОАО «Первоуральский новотрубный завод»	Россия	Превосходят бронзовые
3	ОАО «БЕЛАЗ» - управляющая компания холдинга «БЕЛАЗ-ХОЛДИНГ»	Беларусь	Не уступают бронзовым
4	ОАО «Витебсклифт»	Беларусь	Не уступают бронзовым
5	ОАО «Гомсельмаш»	Беларусь	Не уступают бронзовым
6	ОАО «Управляющая компания холдинга «Бобруйскагромаш»	Беларусь	Превосходят АСП-6
7	ОАО «Амкодор - Дзержинск»	Беларусь	Не уступают бронзовым
8	ОАО «Светлогорск Химволокно»	Беларусь	Не уступают бронзовым
9	ОАО «Белшина»	Беларусь	Не уступают бронзовым
10	Завод «Могилевтрансмаш» ОАО «МАЗ»	Беларусь	Превосходят бронзовые
11	ОАО «Гомельский завод станочных узлов»	Беларусь	Превосходят бронзовые
12	ОАО «Кузлитмаш»	Беларусь	Не уступают бронзовым
13	ОАО «Завод Оптик»	Беларусь	Превосходят бронзовые
14	ЧУП «ВС-Техника»	Беларусь	Не уступают бронзовым
15	ОАО «Оршанский станкостроительный завод «Красный Борец»	Беларусь	Не уступают бронзовым
16	РУП «Завод «Эвистор»	Беларусь	Не уступают бронзовым

Все эти испытания показали, что детали из СГК по износостойкости и ресурсу работы не уступали аналогичным из бронз, либо превосходили их.

Антифрикционный СГК запатентован [4]. В ИТМ НАН Беларуси из СГК изготавливают как сплошные, так и полые заготовки. Их стоимость в 3 раза меньше, чем аналогичных из бронз. Поставка заготовок из СГК осуществляется по ТУ ВУ 700002421.003-2011 на более 60 предприятий Беларуси и России. Область применения заготовок из СГК: подшипники скольжения, шестерни червячных колес редукторов, втулки балансиров и шарнирных соединений, вкладыши люнета токарных станков и прессов, втулки сателлитов дифференциалов и сальниковых букс, поршни гидроцилиндров, направляющие втулки и другие детали узлов технологического оборудования. Общий вид деталей машиностроения из СГК представлен на рисунке 14.



Рисунок 14 – Детали машиностроения из антифрикционного СГК

Таким образом, силумин с глобулярным кремнием является перспективным антифрикционным материалом, который с успехом заменяет более тяжелые и дорогие серийные антифрикционные бронзы.

#### Список литературы:

1. Марукович, Е.И., Модифицирование сплавов / Е.И. Марукович, В.Ю. Стеценко. – Минск: Беларус. навука, 2009. – 192 с.
2. Способ литья заготовок: пат. 2288067 Российская Федерация, МПК В22Д7/00, 27/04 / В.Ю. Стеценко, Е.И. Марукович; Заявитель Ин-т технологии металлов НАН Беларуси. - №2005103161/02; заявл. 08.02.2005; опубл. 20.07.2006 // – Бюллетень / Фед. Служба по интеллект. собств., пат. и тов. зн. – 2006. - №33.
3. Способ охлаждения кристаллизатора: пат. 2342220 Российская Федерация, МПК В22Д11/055 / Е.И. Марукович, В.Ю. Стеценко; Заявитель Ин-т технологии металлов НАН Беларуси. - №2007107234/02; заявл. 26.02.2007; опубл. 27.12.2008 // – Бюллетень / Фед. Служба по интеллект. собств., пат. и тов. зн. – 2008. - №36.
4. Антифрикционный сплав на основе алюминия: пат. 2504595 Российская Федерация, МПК С22С21/04 / В.Ю. Стеценко, Е.И. Марукович; Заявитель Ин-т технологии металлов НАН Беларуси. - №2012119330/02; заявл. 11.05.2012; опубл. 20.01.2014 // – Бюллетень / Фед. Служба по интеллект. собств., пат. и тов. зн. – 2014. - №2.